



Courbes d'écoulement dans les systèmes de mélange : vers une approche simplifiée

Patrice Estellé, Christophe Lanos

► To cite this version:

Patrice Estellé, Christophe Lanos. Courbes d'écoulement dans les systèmes de mélange : vers une approche simplifiée. 43ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie - Rhéologie et thermodynamique, Oct 2008, Palaiseau, France. pp.147-150. hal-00674841

HAL Id: hal-00674841

<https://hal.science/hal-00674841>

Submitted on 28 Jan 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Courbes d'écoulement dans les systèmes de mélange :

Vers une approche simplifiée

P. Estellé, C. Lanos

UEB, LGCGM, Equipe Matériaux et Thermique de l'Habitat, IUT Rennes

Résumé : Le comportement rhéologique de fluides cisailés dans des géométries de mélange est étudié à partir d'une procédure simplifiée de calcul de la vitesse de cisaillement. L'applicabilité de cette procédure est examinée dans le cas de fluides newtoniens et non newtoniens, en s'intéressant à l'influence de la géométrie de mélange. Les résultats sont favorablement comparés à ceux issus de la littérature. On montre ainsi que cette procédure permet de s'affranchir de la détermination préalable d'un rayon virtuel nécessaire à l'application de l'analogie de Couette, ainsi que du choix à priori du comportement rhéologique du fluide cisailé.

Mots-clé : Rhéométrie, Mixer, Vitesse de cisaillement, Courbe d'écoulement

1. Introduction

Il est souvent nécessaire de mélanger et disperser des systèmes afin de produire des matériaux complexes. Ces procédés de mélange peuvent être réalisés à partir de géométries de forme variable : ancre [1], hélice [2], vane [3]. Ces géométries sont également utilisées pour évaluer ou suivre les propriétés rhéologiques des matériaux, en particulier durant les changements de phase ou les traitements thermiques. Le problème principal consiste alors à établir une relation fiable entre le couple et la vitesse de rotation de la géométrie et une contrainte et une vitesse de cisaillement caractéristique du cisaillement du fluide. Différentes méthodes ont été développées dans ce sens [4].

Ainsi, la vitesse de cisaillement est généralement reliée à la vitesse de rotation par une constante liée à la géométrie utilisée [5]. Cette constante s'obtient par une méthode de pente ou d'ajustement de viscosité. Cette dernière solution requiert deux essais au moins et dépend du comportement rhéofluidifiant du fluide utilisé. Une méthode plus récente est basée sur l'analogie de Couette [6,7,2]. Elle consiste à déterminer un rayon interne équivalent à celui d'un cylindre virtuel, qui permet d'obtenir un couple identique appliquée à la géométrie de mélange et au cylindre virtuel pour une même vitesse de rotation. Cette procédure requiert de définir au préalable la nature du comportement du fluide - généralement de type loi puissance - et de calibrer le système de mélange. L'évaluation du rayon interne virtuel est déterminée au préalable en utilisant un fluide newtonien de viscosité connue.

On se propose ici d'appliquer une procédure développée pour une géométrie Couette [8,9] permettant de générer

simplement la courbe d'écoulement du fluide cisailée. L'objectif est de s'affranchir des limitations mentionnées ci-avant : pré spécification de la loi de comportement, étalonnage de la géométrie, essais préliminaires avec un fluide Newtonien.

Dans le but de valider notre procédure, nous avons considéré des données expérimentales issues de la littérature, en étudiant en particulier l'influence du comportement du fluide, ainsi que la forme de la géométrie de mélange.

2. Théorie

La relation contrainte-vitesse de cisaillement dans une géométrie Couette est établie en considérant localement le fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham [8]. Pour un tel fluide, l'expression de la vitesse de cisaillement dépend du régime d'écoulement dans l'entrefer. Ainsi, la vitesse de cisaillement s'exprime par les équations (1) et (2), lorsque respectivement le fluide est partiellement cisailé, complètement cisailé dans l'entrefer.

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \quad (1)$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega_c - M \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad (2)$$

Où R_b et h désignent le rayon et la hauteur du cylindre interne, et R_c est le rayon externe. Ω et M représentent respectivement la vitesse de rotation du cylindre interne et son couple.

Le principe de maximisation de la dissipation d'énergie au sein de l'écoulement permet de distinguer la vitesse de

cisaillement caractéristique entre les équations (1) et (2). Ainsi à partir d'une rampe croissante et/ou décroissante en vitesse de rotation Ω_j , on peut calculer la vitesse de cisaillement, ainsi que la contrainte correspondante à partir de l'équation (3).

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_j + \tau_{j-1}) \text{ avec } \tau_j(M) = \frac{M_j}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R_b^2} \quad (3)$$

Notons que la dérivée $\frac{d\Omega}{dM}$ est simplement approchée par $\frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{M_j - M_{j-1}}$.

Cette procédure d'obtention d'une courbe d'écoulement dans une géométrie Couette a été testée et validée pour différents fluides et tailles d'entrefer [8]. Elle a été étendue avec succès à une géométrie vane pour plusieurs types de matériaux [9]. On se propose de l'appliquer ici à des géométries de type mixer, et de comparer nos résultats à ceux issus de la littérature.

3. Application expérimentale

3.1 Influence du comportement rhéologique

Un nouveau type de mélangeur-rhéomètre, nommé Rheo-FX et détaillé par la figure 1, a été développé par [10]. Ses caractéristiques géométriques sont les suivantes : $R_2=14,26\text{mm}$, $R_1=19\text{mm}$, et $H=17,7\text{mm}$. Ce système a été utilisé pour caractériser les propriétés rhéologiques de suspensions énergétiques, en s'appuyant sur l'analogie de Couette décrite en introduction. Les constantes de ce rhéomètre et le rayon virtuel équivalent ont été obtenus en utilisant plusieurs fluides newtoniens, de viscosité variable, ainsi qu'une géométrie de Couette (rayon interne $R_b=18,96\text{mm}$, rayon externe $R_c=19,99\text{mm}$, hauteur $h=23,49\text{mm}$). Le rayon virtuel équivalent ainsi obtenu est $17,17\text{mm}$. Les données couple/vitesse de rotation obtenues par [10] pour 3 fluides newtoniens (liquiflex H, urethane H-200-AT (Vosschemie), huile de silicone Rhodorsil 47V500) sont utilisées pour tracer la courbe d'écoulement de ces matériaux via la procédure proposée ici. Le rayon R_b considéré ici, égal à $17,42\text{mm}$, est obtenu seulement par des considérations géométriques [11], et est proche du rayon virtuel.

La figure 2 décrit les résultats obtenus par l'approximation de Bingham pour les deux géométries, Couette et Rheo-FX, dans le cas des fluides visqueux newtoniens. On constate, comme attendu, que les fluides se comportent comme des fluides newtoniens, et que les courbes obtenues par les deux géométries concordent parfaitement. L'ajustement d'une droite de régression sur ces courbes permet d'évaluer la viscosité de chacun des fluides. Le calcul de l'erreur relative sur la viscosité obtenue par rapport à la viscosité connue des fluides est

également réalisé. Ces valeurs sont rassemblées dans le tableau 1. On constate que l'erreur maximale dans le cas de la géométrie Couette est de 6,6%, et 14 % dans le cas du rhéomètre Rheo-FX.

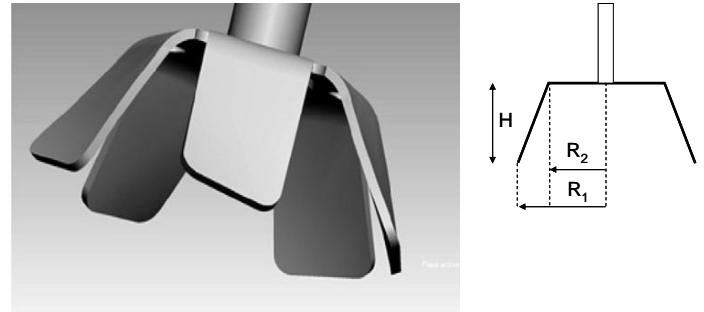


Figure 1 : Rheo-FX développé par [10], gauche : vue complète ; droite : vue schématique de profil.

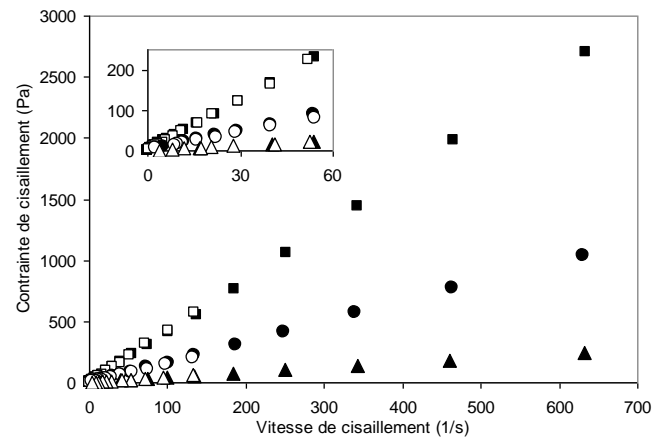


Figure 2 : Courbes d'écoulement de fluides newtoniens en géométrie Couette (symboles noirs) et Rheo-FX (symboles clairs) par l'approximation de Bingham - □ Liquiflex ; ○ Urethane ; △ 47V500.

Fluide	$\eta(\text{Pa.s})$ - Couette	Erreur (%)	$\eta(\text{Pa.s})$ - Rheo-FX	Erreur (%)
Liquiflex	4.2	5.8	4.2	5.6
Urethan	1.7	5.1	1.5	14
47V500	0.4	6.6	0.46	8

Tableau 1 : Viscosité des fluides obtenue par régression des courbes d'écoulement.

Les courbes d'écoulement obtenues pour des suspensions énergétiques (nommées E1 et E4, [10, 11]) sont présentées sur la figure 3. Guillemain et al. [10] ont considéré dans leurs travaux que ces suspensions se comportent comme un fluide en loi puissance. Comme attendu, ces suspensions se comportent comme un fluide rhéofluidifiant. L'ajustement d'une loi puissance sur les courbes de la figure 3 permet d'évaluer les paramètres de cette loi et de les comparer à ceux obtenus par [10], qui sont considérés comme des valeurs de référence (seul ce

rhéomètre est utilisé pour caractériser les suspensions). Les résultats sont décrits par le tableau 2. On constate dans ce cas aussi la bonne concordance des paramètres identifiés. L'erreur maximale sur l'évaluation de la consistance est de 9,3%, celle sur l'évaluation de l'index d'écoulement est de 10,9%.

Notons finalement que, du fait du comportement rhéologiques des matériaux, seule l'équation (2) est ici caractéristique de la vitesse de cisaillement du fluide.

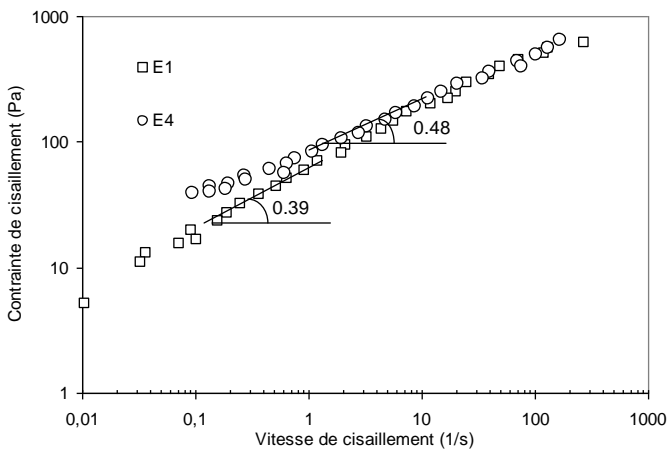


Figure 3 : Courbes d'écoulement des suspensions énergétiques obtenues par le Rheo-FX et l'approximation de Bingham.

	k (Pa.s ⁿ)	Erreur (%)	n (-)	Erreur (%)
E1	58.3	4.8	0.48	10.9
E4	81.2	9.3	0.39	2.1

Tableau 2 : Consistance et index d'écoulement des suspensions énergétiques obtenus par régression des courbes d'écoulement.

3.2 Influence de la géométrie de mélange

Roos et al. [3] ont évalué récemment dans quelle mesure des géométries de mélanges peuvent être utilisées pour évaluer les propriétés rhéologiques de suspensions alimentaires contenant de larges particules. Trois types de géométries ont été utilisés dans cette étude (voir figure 4) : une géométrie vane de grande dimension à 6 pales (40mm de diamètre et 60mm de hauteur), une géométrie vane de faible dimension à 4 pales (20mm de diamètre et 40mm de hauteur), et une hélice (36mm de diamètre and 40mm de hauteur). Le container cylindrique est identique dans tous les cas, de rayon 48,8mm. Comme dans la section précédente, les auteurs [3] ont dépouillés les essais réalisés avec les trois géométries à partir de l'analogie de Couette, et en assumant que les fluides se comportent comme un fluide en loi puissance. Les essais réalisés avec une préparation à base de framboise, contenant des particules de 2 mm de diamètre moyen sont ici analysés à partir de l'approximation de Bingham.

La figure 4 reporte les courbes d'écoulement obtenues pour ce matériau, pour les 3 géométries utilisées. Les symboles noirs représentent les résultats de [3], qui sont comparés à ceux générés par notre procédure (symboles clairs).

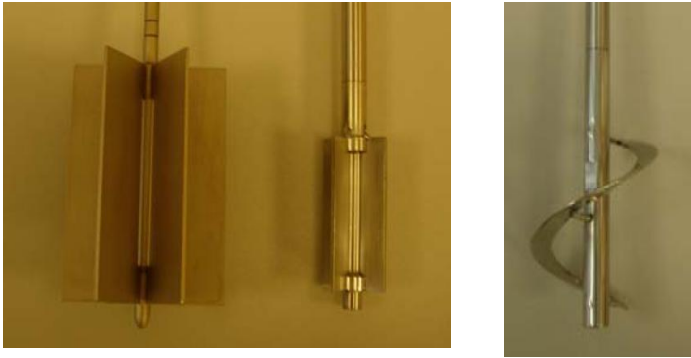


Figure 4 : Géométries utilisées par [3], gauche : vanes ; droite : hélice.

On constate que les courbes sont en bon accord, indépendamment de la géométrie de cisaillement. Avec les géométries à ailettes, nous avons utilisé le rayon réel du cylindre équivalent, qui est proche et légèrement supérieur au rayon virtuel [11]. Cette approximation influence faiblement les résultats dans le cas de fluide en loi puissance, en particulier pour des vitesses de cisaillement supérieure à 10 s⁻¹ [9]. Dans le cas de l'hélice, le rayon approprié est celui de la partie interne de la géométrie, valeur proche du rayon virtuel [11]. Ceci tend à prouver que le cisaillement se produit dans la partie intérieure de l'hélice.

Les valeurs moyennes de consistance et d'index d'écoulement sont respectivement 21,6 Pa.sⁿ et 0,34. Ces valeurs sont en accord avec celles obtenues par [3], respectivement 21 Pa.sⁿ et 0,37. De plus, la figure 4 montre l'indépendance des géométries de mesure vis-à-vis du comportement rhéologique de la suspension. La taille de l'entrefer étant différente pour chaque géométrie, la gamme de vitesse de cisaillement obtenue diffère sensiblement, notamment à faible vitesse de cisaillement. Plus grand est l'entrefer, plus faible est la gamme de vitesse. Ce résultat est comparable au cas d'un fluide newtonien dont le cisaillement est généré avec deux vanes de diamètre différent [9]. Ici aussi, la comparaison des équations (1) et (2) montre que le fluide est cisailé dans tout l'entrefer.

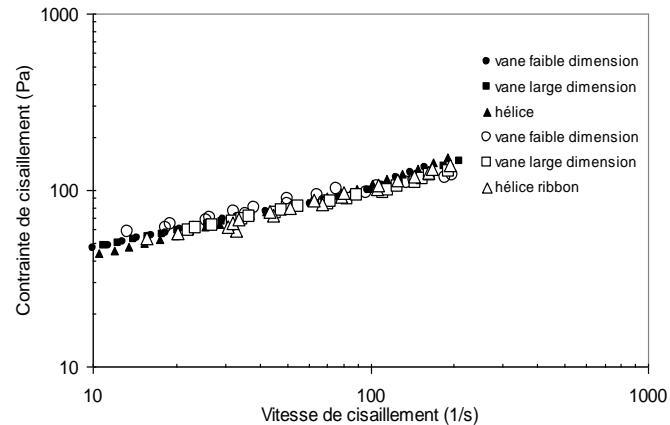


Figure 5 : Courbes d'écoulement de la suspension alimentaire à base de framboise – symboles noirs [3] ; symboles clairs : approximation de Bingham

4. Conclusion

L'application d'une procédure simplifiée pour déterminer la courbe d'écoulement générée par une géométrie de mélange a été testée et validée. L'influence du comportement rhéologique du fluide, ainsi que la forme de la géométrie a été étudiée. Les résultats montrent que cette procédure permet d'identifier le comportement du fluide, indépendamment du système de mélange. Les paramètres évalués sont en accord avec ceux issus de la littérature. De plus, le choix à priori du comportement du fluide n'est pas nécessaire, ni le calcul d'un rayon virtuel, en particulier lorsque le fluide est cisailé le long d'une surface cylindrique.

Références

- [1] Anne-Archard D., Marouche M., Boisson H.C., Hydrodynamics and Metzner–Otto correlation in stirred vessels for yield stress fluids, *Chem. Eng. J.*, 125, 15-24 (2006).
- [2] Choplin L., In situ rheological follow-up of food processes: application to emulsification and ice cream fabrication process, *Proceedings of the 2nd ISFRS*, Zurich, Switzerland, 63-68 (2000).
- [3] Roos H., Bolmstedt U., Axelsson A., Evaluation of new methods and measuring systems for characterisation of flow behaviour of complex foods, *Appl. Rheol.* 16 19-25 (2006).
- [4] Steffe J.F., *Rheological methods in food engineering process*, 2d Edition, Freeman Press, East Lansing, USA, 1996.
- [5] Metzner A.B., Otto R.E., Agitation of non-Newtonian fluids, *AIChE J.* 1 3-10 (1957).
- [6] Bousmina M., Ait-Kadi A., Faisant J.B., Determination of shear rate and viscosity from batch mixer data, *J. Rheol.* 43 415-433 (1999).
- [7] Ait-Kadi A., Marchal P., Choplin L., Chrissemant A-S., Bousmina M., Quantitative analysis of mixer-type rheometers using the Couette analogy, *Canadian J Chem Eng.* 80, 1166-1174 (2002).
- [8] Estellé P., Lanos C., Perrot A., Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 154 31-38 (2008).
- [9] Estellé P., Lanos C., Perrot A., Amziane S., Processing the vane shear flow data from Couette analogy, *Appl. Rheol.* 18:3, 34037 (2008).
- [10] Guillemain J.P., Menard Y., Brunet L., Bonnefoy O., Thomas G., Development of a new mixing rheometer for studying rheological behaviour of concentrated energetic suspensions, *J Non-Newtonian Fluid Mech.* 151 136-144 (2008).
- [11] Estellé P., Lanos C., Shear flow curve in mixing systems - A simplified approach, *Chem. Eng. Sci.*, 63 (24), 5887-5890 (2008).